

# **Invloed van de vermogenelektronica op de elektrische motor**

**R.Belmans**

**A.Malfait**

**K.U.Leuven - Dep.EE-Labo EMA  
Kard. Mercierlaan 94  
3001 HEVERLEE**

## **Inleiding**

Elektrische machines worden in de industrie toegepast voor een brede waaier van applicaties. Omwille van de vereiste flexibiliteit in de productie worden heden ten dage meer en meer toerentalgeregelde aandrijvingen gebruikt.

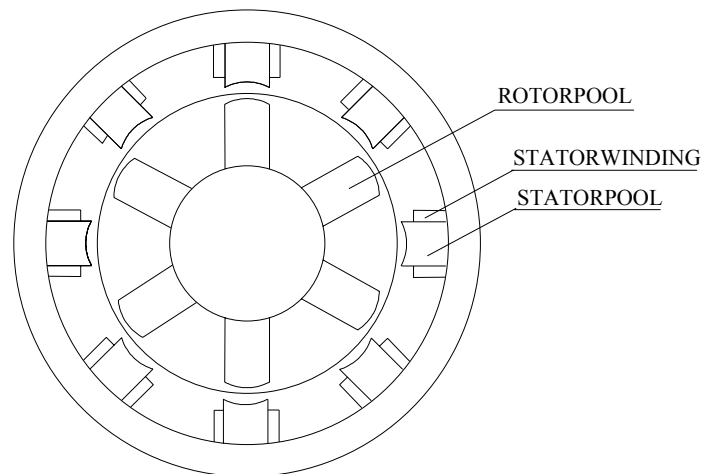
Toerentalregeling was tot begin jaren tachtig het prioritair domein van de gelijkstroommotor met onafhankelijke bekrachtiging. Hierbij werd overgegaan van de draaiende Ward-Leonard groep naar de een- of vierkwadrant gelijkrichterschakelingen. De problemen van dit type motor zijn bekend en hangen praktisch allemaal samen met de aanwezigheid van de collector en de borstels.

De inductiemotor met kooirotor is veel robuuster en kent de problemen van de gelijkstroommotor niet. Bij voeding vanuit het normale net met vaste spanning en vaste frequentie is het praktisch onmogelijk om de snelheid te regelen. De ontwikkelingen in de vermogenelektronica laten toe om op vlotte wijze een variabele frequentie en spanning aan te leggen om aldus een variabel toerental te bekomen.

Naast deze twee motortypes worden in de praktijk nog een groot aantal andere motortypes gevonden. Zonder volledig te willen zijn, vermelden wij:

- gelijkstroommotor met permanent magneetbekrachtiging;
- gelijkstroomseriemotor en universeel motor;
- synchrone motor met elektrische bekrachtiging (zeer grote vermogens);
- synchrone motor met permanente magneten-borstelloze gelijkstroommotor;
- reluctantiemotor
- geschakelde reluctantiemotor;
- inductiemotor met bewikkelde rotor en sleepringen.

De principes van meeste van deze motoren zijn reeds lang bekend. Van recentere datum is de geschakelde reluctantiemotor. Hierbij worden een rotor en een stator met een verschillend aantal polen gecombineerd. Beiden hebben uitspringende polen en zijn samengesteld uit gelamelleerd magnetisch materiaal. De rotor heeft geen geleidend materiaal. Rond elke statorpool wordt een geconcentreerde wikkeling geplaatst. De wikkelingen worden achtereenvolgens ingeschakeld (steeds twee diametraal gelegen wikkelingen om radiale krachten te vermijden) en de dichtsbijgelegen rotorpolen worden aangetrokken, daar de rotor zich tracht te aligneren met de stator om aldus de hoeveelheid opgeslagen magnetische energie te minimaliseren. Het principe is op figuur 1 weergegeven. Om de achtereenvolgende polen op het juiste ogenblik met de gelijkspanningsvoeding te verbinden, is een vermogenelektronische schakeling nodig. De sturing van de vermogenelektronische componenten dient rekening te houden met de exacte positie van de rotor. Dit type motor is heel eenvoudig en goedkoop qua opbouw, doch de totale aandrijving, bestaande uit motor, vermogenelektronische omvormer en positiegever, is duur.



*Fig.1 Principe van de geschakelde reluctantiemotor*

Het doel van deze bijdrage is aan te geven hoe de vermogenelektronische sturingen, vooral bij inductiemotoren met kooirotor, interageren met de motor en dit op verschillende vlakken. Er wordt ook aangegeven of en hoe deze problemen meespelen bij andere motortypes. Verder worden enige richtingen gegeven voor een aangepaste keuze van een aandrijving voor een toepassing. Hierbij worden niet alleen nieuwe systemen behandeld, maar ook de introductie van omvormers in bestaande machines.

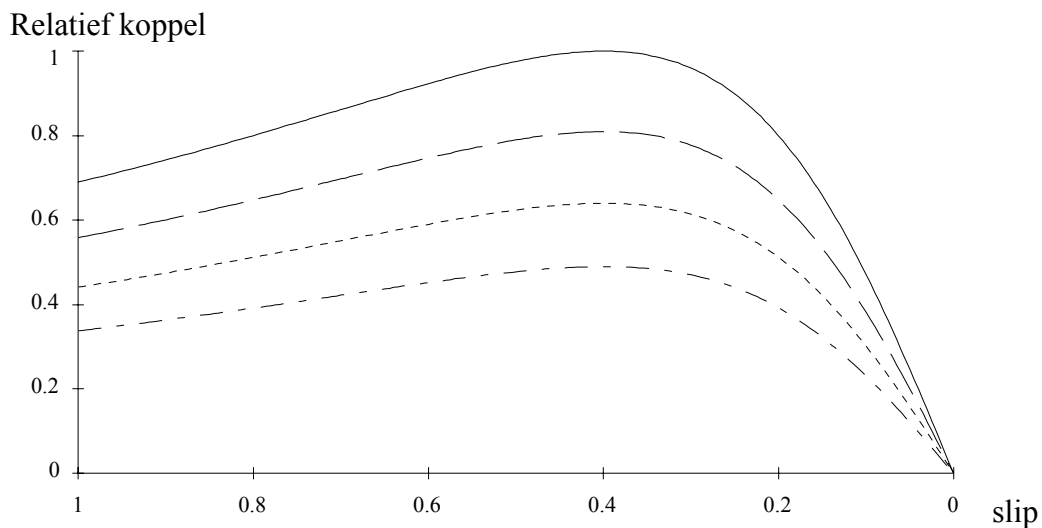
## **Trillingen**

Trillingen zijn steeds een belangrijk probleem geweest in elektrische aandrijvingen. Vooral tijdens overgangsverschijnselen kunnen grote koppelpieken ontstaan ten gevolge van elektromechanische fenomenen. Ook tijdens de stationaire toestand kunnen trillingen optreden. Twee types trillingen zijn gevaarlijk:

- torsietrillingen: door tijdsafhankelijke koppels wordt de as getordeerd;
- radiale trillingen: doorbuiging van de as door een onbalans of andere krachten loodrecht op het rotoroppervlak.

De torsietrillingen ten gevolge van overgangsverschijselen zijn veel minder uitgesproken bij omvormervoeding dan bij voeding vanuit een star net. Door een correcte regeling is het immers mogelijk praktisch alle overgangsverschijselen en de ermee gepaard gaande koppelstoten te vermijden. De motor loopt op een quasi-stationaire wijze aan.

Bij voeding vanuit het star net, kunnen koppels tot tien maal het stationaire kippkoppel gemeten worden en as breuk in aandrijfsystemen kan hierdoor verklaard worden. Om dit te vermijden, werden systemen uitgedacht om de spanning tijdens de start te verminderen (ster-driehoek; autotransformator; statorimpedantie; softstarters). Alhoewel dit soms beweerd wordt, zorgen zulke spanningsregelingen niet voor een toerentalregeling, tenzij een motor met hoge rotorweerstand en dus slecht rendement gebruikt wordt (Figuur 2).



*Fig.2 Koppel-toerental karakteristiek bij geregelde spanning.*

In stationaire toestand kunnen twee types trillende koppels onderscheiden worden. Vooreerst zijn er de trillende koppels ten gevolge van de vertanding van rotor en stator. Deze koppels zijn meestal erg klein en vormen geen gevaar voor de aandrijving. Zij kunnen echter interfereren met systemen voor predictief onderhoud, die gebaseerd zijn op het meten van lagertrillingen.

Bij asymmetrieën in stator en rotor komen trillingen voor op dubbele netfrequentie (stator) en op dubbele slipfrequentie (rotor). Bij een asymmetrische schakeling in de stator kan het veld in de luchtspleet gesplitst worden in een meelopend en een tegenlopend veld. Door de interactie van het tegenlopend veld met de meelopende component ontstaat een trillend koppel op dubbele netpulsatie daar het snelheidsverschil tussen beiden tweemaal de netfrequentie is. Bij de rotor doen de verschijnselen zich voor op slipfrequentie, zodat de interactie daar leidt tot een trilling op het dubbele van de netpulsatie. Meestal duiden deze asymmetrieën op fouten (een van de statorfasen onderbroken, gedeeltelijk kortgesloten statorwikkeling, gebroken rotorstaaf). Sommige machines hebben echter asymmetrieën ingebouwd, zoals de eenfasige

condensatormotoren in de stator, en de synchrone machine met magnetische en elektrische asymmetrieën in de rotor.

Het is duidelijk dat de frequentie van deze trillingen varieert als de motor gevoed wordt met een variabele frequentie.

Als een niet sinusoidale stroom of spanning aan een motor aangelegd wordt, kan deze ontbonden worden in zijn harmonischen:

$$u(t) = \sum_{\nu} U_{\nu} \cos(\nu\omega t + \varphi_{\nu,u})$$

$$i(t) = \sum_{\nu} I_{\nu} \cos(\nu\omega t + \varphi_{\nu,i})$$

$$\nu = 2g + 1, \quad g \in \mathbb{Z}_0$$

$\omega$  is de pulsatie van de fundamentele componente. Door de interactie van deze componenten ontstaan trillende koppels met frequentie 6,12,18,...maal de frequentie van de fundamentele voedende spanning. Indien de rotor van een inductiemotor met bewikkelde rotor via zijn sleepringen verbonden wordt met een omvormer om de slipenergie terug naar het net te sturen (ondersynchrone cascadeschakeling), worden trillingen op de 6,12,18,...slipfrequentie gevonden, daar de tijds-harmonischen nu in de rotor optreden en in de bovenstaande formules de voedingsfrequentie vervangen dient te worden door de slipfrequentie.

Deze koppels worden gesuperponeerd op het gemiddeld koppel van de motor. Het effect op de snelheid van de aandrijving hangt af van de traagheid van het geheel. Verder kan er resonantie optreden daar de koppeling tussen de verschillende onderdelen meestal flexibel is. Soms is het aangewezen om de motor en de last te ontkoppelen via een flexibele koppeling.

Door de wijziging van de snelheid is het mogelijk dat de snelheid gelijk wordt aan de kritische snelheid van het systeem. Dit leidt dan meestal tot heel grote trillingsamplitudes, zodat de rotor de stator raakt en de motor vernietigd wordt. Verder is de kritische snelheid afhankelijk van de flux in de machine, zodat in het gebied van de hoge snelheden, waar de flux verlaagd wordt, de kritische snelheid wijzigt. De problemen treden vaak op bij grote tweepolige machines. Deze motoren hebben vaak een kritische snelheid die lager is dan snelheid bij voeding met 50 Hz. Dit is zelden een probleem bij voeding vanuit een star net: de kritische snelheid wordt zeer snel doorlopen, zodat de tijd onvoldoende is om de nodige energie op te stapelen opdat de trillingen bij resonantie gevaarlijke proporties zouden aannemen. De situatie wordt echter helemaal anders bij omvormervoeding: de ganse snelheidszone tussen stilstand en maximale snelheid, waarin zich ook de kritische snelheid bevindt, kan continu doorlopen worden, waarbij elk punt een stationair punt kan zijn. De mechanische constructie moet dan ook zodanig zijn dat de kritische snelheid best buiten het werkingsgebied ligt. Dit is in de praktijk niet altijd mogelijk. Er moet dan voor gezorgd worden dat de regeling van de omvormer de werking in de buurt van het kritisch toerental uitsluit. Er dient hier echter op gewezen te worden dat het kritisch toerental van een elektrische machine geen zuiver mechanisch gegeven is, maar mee bepaald

wordt door het magnetisch veld via de zogenaamde eenzijdige elektromagnetische trekkrachten. Elektromagnetische trekkrachten proberen bij een rotor met een onbalans die doorbuigt onder invloed van de centrifugale krachten, de rotor verder door te buigen om zo de kleinste luchtspleet te verkleinen. Deze krachten zijn evenredig met de rotordoorbuiging en zijn tegengesteld gericht aan de mechanische terugstelkracht. Omwille van deze tegengestelde richting moeten zij ingerekend worden als een negatieve veerconstante en verlagen zij het kritisch toerental.

## Geluid

Het is een gekend fenomeen dat het geluidsniveau van een inductiemotor toeneemt als hij gevoed wordt met een frequentie-omvormer. Het geluid wordt opgewekt door de Maxwellse trekspanningen die veroorzaakt worden door het magnetisch veld dat uit het ijzer gaat en aangrijpen op de tanden van het blikpakket. Dit zijn trillende krachten en kunnen de statorstructuur in resonantie brengen, wat tot hoge geluidsniveaus leidt. Hieruit volgt het gevaar van het gebruik van frequentie-omvormers voor geluidsproductie; de frequentie-inhoud van de krachten wijzigt en bij toerentalregeling kan op een bepaald ogenblik resonantie optreden en neemt het geluidsniveau enorm toe. Dit is een gevolg van de hogere harmonischen in de spanning en de stroom. Door gebruik te maken van pulsbreedtemodulatie technieken (PWM: Pulse Width Modulation) is het mogelijk om deze harmonischen te verminderen. Hoe hoger de schakelfrequentie van de omvormer, des te beter de zuivere sinus kan benaderd worden.

Hierbij mag een ding niet over het hoofd gezien worden: hoe hoog de schakelfrequentie van de omvormer mag zijn, bij de nominale frequentie (meestal 50 Hz), wordt een blokgolf aan de motor aangelegd, dit om een zo hoog mogelijk spanningsniveau te bekomen. Met andere woorden bij de hogere frequenties spelen de in de omvormer gebruikte componenten quasi geen rol.

Op figuur 3 wordt het geluid (in dB(A)) vergeleken voor eenzelfde motor (90 kW, vierpolige standaard inductiemotor met kooirotor), gevoed met een variabele frequentie. Het geluidsniveau bij voeding met een spanningstussenkringomvormer is beduidend hoger dan bij voeding met een omvormer met stroomtussenkring. De spanningstussenkringomvormer is uitgerust met pulsbreedtemodulatie op lage schakelfrequentie. De derde voedingsbron is een synchrone generator die op variabele snelheid aangedreven wordt, zodat de spanning een regelbare frequentie heeft. Deze bron mag beschouwd worden als vrij van harmonischen.

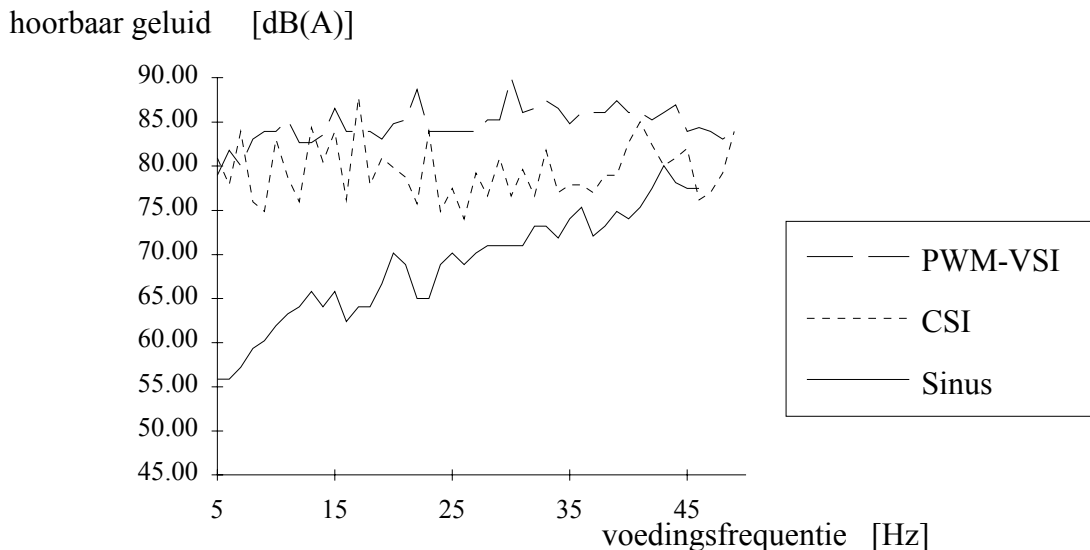


Fig. 3 Geluidsvergelijking voor een vierpolige standaard inductiemotor met kooirotor (90 kW), gevoed met een variabele frequentie

Op figuur 4 is het frequentiespectrum van het geluid van de 90 kW gegeven bij een frequentie van de pulsbreedtegemoduleerde omvormer van 34 Hz. Uit deze figuur blijkt duidelijk dat het geluid zuivere tonen bevat. De aanwezigheid van zuivere tonen wordt door de mens als erg storend aanvoeld: eenzelfde geluidsniveau in dB(A) wordt 10 dB luider ervaren als het zuivere tonen bevat dan als het een vlak spectrum heeft.

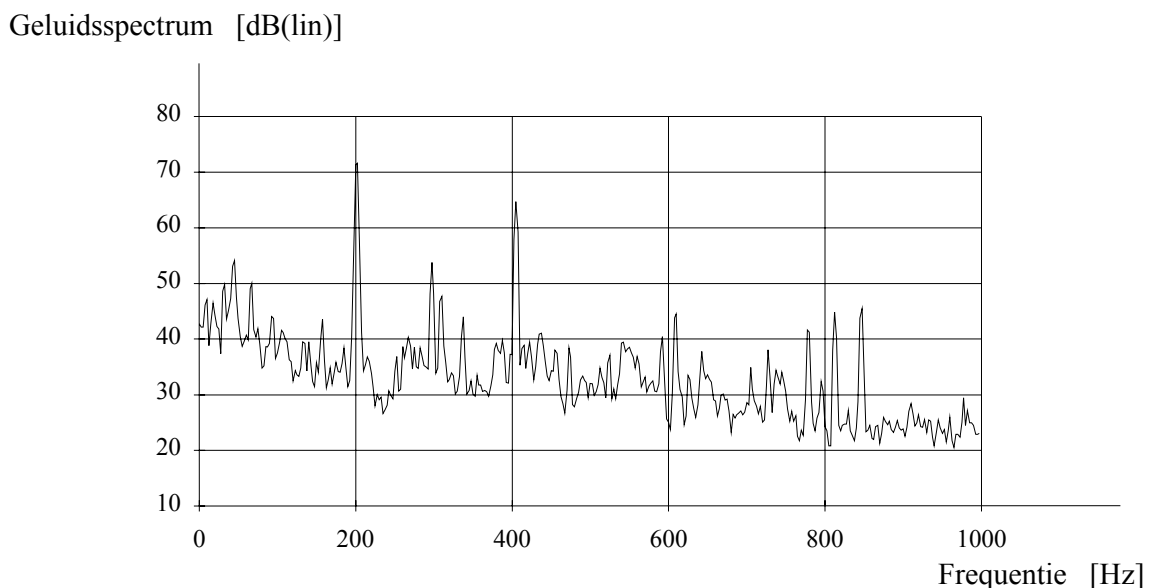
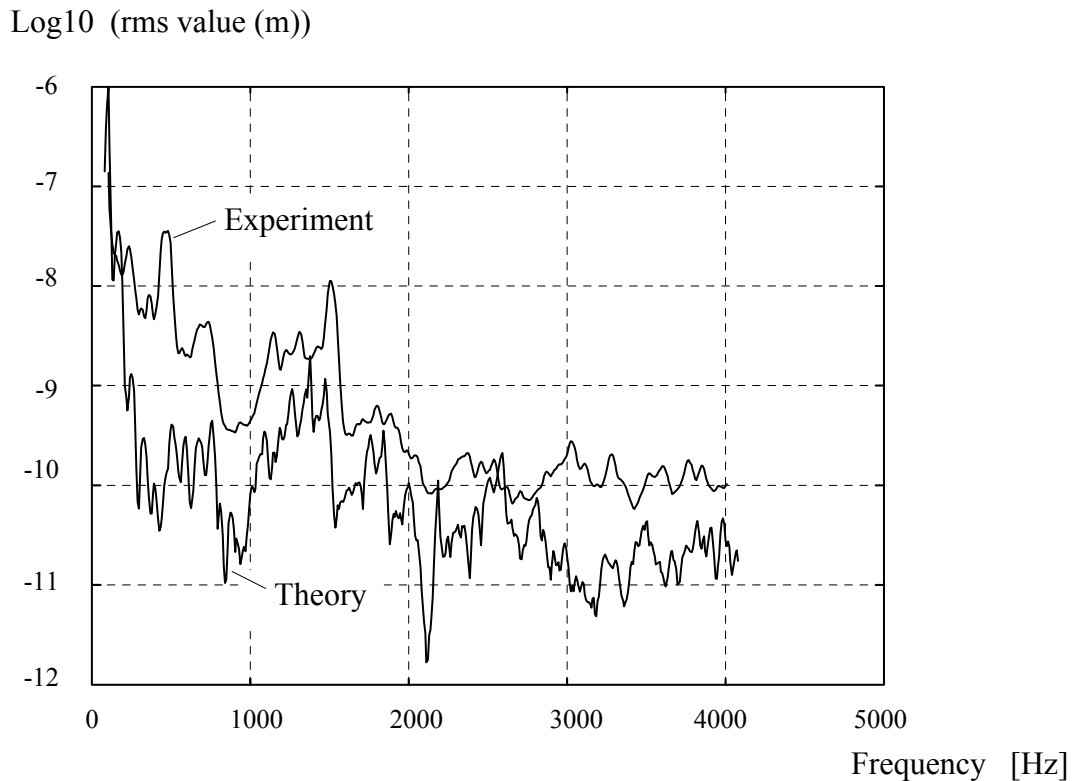


Fig. 4 Frequentiespectrum van het geluid van een 90 kW motor gevoed door een pulsbreedtegemoduleerde omvormer bij een frequentie van 34 Hz

Zoals gesteld treden hoge geluidspieken dan op als een van de elektromagnetische krachten in resonantie komt met de mechanische statorstructuur. Daar de opwekkende frequenties van de elektromagnetische krachten wijzigen in functie van de fundamentele van de aangelegde spanning, zijn zulke resonanties niet uit te sluiten. Door over te gaan op een ander pulspatroon kan in moderne omvormers resonantie door de harmonischen

van de spanning vermeden worden. Er wordt dan een voor de verliezen meestal niet optimaal pulspatroon bekomen, zodat men hier dient af te wegen wat belangrijk is, geluid of verliezen.

Ook hoogfrequente stroomcomponenten kunnen bijdragen tot het geluid van elektrische machines. Op figuur 5 is het spectrum van het geluid gegeven van een permanent magneet synchrone motor gevoed met een transistoromvormer. De omvormer heeft een relatief zuivere spanningsvorm. De geluidspiek is een gevolg van een van de hogere harmonischen in de stroom.



*Fig. 5 Geluidsspectrum van een permanent magneet motor gevoed met een transistoromvormer*

Er dient hier benadrukt te worden dat naast het geluid op magnetische wijze veroorzaakt ook andere aspecten in ogenschouw dienen genomen te worden. Zo is er het geluid van de lagers, dat bij een juiste keuze meestal verwaarloosbaar is. Belangrijker is het geluid van de ventilator. Als hoge voedingsfrequenties gebruikt worden, neemt het ventilatorgeluid sterk toe. Ook het vermogen dat gebruikt wordt door de ventilator stijgt sterk. Om deze problemen te vermijden gebruikt men vaak een onafhankelijk geventileerde machine bij hogere snelheden.

## **Overspanningen en isolatieproblemen**

De isolatie van de stator moet bestand zijn tegen de spanningspieken en tegen de spanningsveranderingen die door de omvormer geleverd worden.

Indien de schakelfrequentie relatief laag is (omvormers met thyristoren, GTO's en transistoren) dient men er vooral op te letten dat de lekreactantie van de motor aangepast is aan het type omvormer.

Een stroomtussenkringomvormer drukt een quasi blokgolfvormig stroompatroon op aan de motor. Indien de motor een grote lekreactantie heeft, leidt dit tot hoge spanningspieken. Een stroomtussenkringomvormer kan dus niet gecombineerd worden met een motor met hoge lekreactantie, wat vooral het geval is bij motoren met magnetische spieën boven de rotor- en / of statorgleuven.

Een spanningstussenkringomvormer drukt een blokgolfvormige spanning op, eventueel meerdere blokgolven per periode van de fundamentele als men met pulsbreedtemodulatie werkt. Indien de lekreactantie van de motor laag is, ontstaan er grote stroompieken. Een spanningstussenkringomvormer vraagt dan ook om gekoppeld te worden met een motor met een voldoende hoge lekreactantie. Vaak kunnen problemen opgelost worden door de statorgleuven met magnetische spieën.

Door in te grijpen op het motorontwerp kan het voorkomen dat door de grote lekinductantie de motor onvoldoende kippkoppel heeft om rechtstreeks op het net te starten. Indien gewenst wordt dat voor noodgevallen de werking zonder omvormer moet mogelijk blijven, dient hiermee rekening gehouden te worden. Deze ganse problemen zijn uiterst belangrijk bij omschakeling van een bestaande installatie met constante snelheid naar variabele snelheid met behoud van de motoren.

In moderne omvormers met uiterst snel schakelende componenten, is de spanningsgolf die aan de motor toekomt erg stijl. Indien de kabel tussen motor en omvormer relatief lang is (200 à 300 m), kunnen lopende golven ontstaan die aan de motor weerkaatst worden, zodat de piekspanning verdubbelt, wat de motorisolatie erg belast en tot doorslag van de isolatie kan leiden (figuur 6).

*Fig. 6 Overspanningen met een omvormer*

Zulke grote afstanden komen vaak voor in explosievrije toepassingen waar de motor zich in de beschermde zone bevindt en de omvormer niet. Het hoeft geen betoog dat een isolatiedoorslag in een motor in een ruimte waarin een explosief mengsel kan optreden ten allen prijze vermeden dient te worden. Maatregelen voor een gepaste kabelkeuze dringen zich dan op.

Bij koppeling van een bestaande motor dient de isolatieweerstand en de tangens  $\delta$  van de statorisolatie opgemeten te worden teneinde eventuele fouten op te sporen. Ook de polarisatie-index moet gemeten worden om te zien of de wikkeling droog is.

## **Mechanische problemen**

Hogere snelheden samen met de hogere rotortemperaturen als gevolg van de bijkomende verliezen, waardoor de as opwarmt, hebben invloed op het smeringsinterval en de levensduur van de lagers.

De hogere harmonischen kunnen spanningen induceren langs de motoras en de behuizing. Hierdoor ontstaan schadelijke lagerstromen, als de lagers niet geïsoleerd zijn. Bij bestaande motoren met niet-geïsoleerde lagers, wordt best isolatie rond de lagers aangebracht.

De uitbalancerings van de rotor van bestaande motoren is van enorm belang, vooral als men de snelheid wil opdrijven boven de normale nominale snelheid aan het 50 Hz net.

De koppeling tussen motor en last moet kunnen weerstaan aan alle componenten van het koppel. Hierbij moet niet alleen gedacht worden aan het gemiddeld stationair koppel, maar vooral aan koppeltrillingen bij hoge snelheid. Meestal is een flexibele koppeling aangewezen, doch resonanties moeten in het oog gehouden worden.

Door de statorstroom te onderzoeken kan nagegaan worden of er gebroken rotorstaven zijn. Als een of meer rotorstaven gebroken zijn, dan is de statorstroom gemoduleerd met de slipfrequentie. Verder dient het gebruik van schuingestelde rotorstaven vermeden te worden daar deze samen met de omvormervoeding kunnen leiden tot trillende axiale krachten.

Het gebruik van schuingestelde staven, samen met speciale rotorgleufvormen hadden tot doel in de klassieke netvoeding de overgangsverschijnselen tijdens de aanloop, zoals aanloopstroom en parasitaire koppels te beperken. Daar de omvormervoeding alle overgangsverschijnselen uitschakelt, zijn deze zaken niet meer vereist en zoals hoger ook reeds gesteld, meestal ongewenst. Dit is onder andere ook nog van belang met het oog op de verliezen die in de volgende paragraaf behandeld worden.

## **Verliezen**

De harmonische stromen en spanningen die door de omvormer aan de motor geleverd worden, zorgen voor bijkomende velden in de luchtspleet. Ten opzichte van deze velden staat de rotor praktisch stil. Inductiemotoren die gebouwd zijn om aan het vast net aangesloten te worden, hebben rotorstaven die ervoor zorgen dat in stilstand de stroom praktisch volledig in het bovenste gedeelte van de staaf vloeit om op deze wijze het startkoppel te verhogen en de startstroom te beperken.

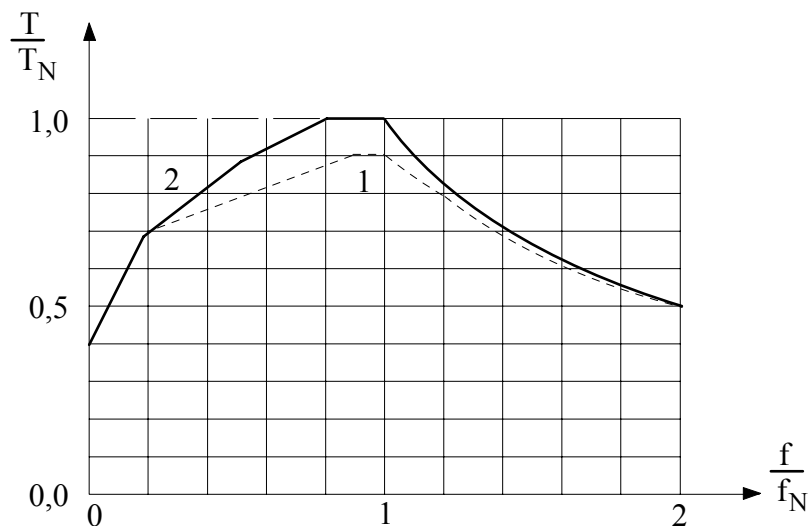
De hogere harmonische velden veroorzaakt door de harmonischen van de omvormer, induceren ook stromen in de rotorstaven die zich concentreren in het bovenste gedeelte van de staaf (figuur 7). Hierdoor ontstaan relatief grote bijkomende verliezen, zelfs als de spannings- en stroomharmonischen op zichzelf klein zijn. Hierdoor wordt de machine sterker opgewarmd en moet het motorvermogen verlaagd worden in

vergelijking met de voeding vanuit het star net, tenzij er aanpassingen aan het koelsysteem gebeuren.

*Fig. 7 Geïnduceerde stroom in de rotostaven ten gevolge van hogere harmonische velden veroorzaakt door de harmonischen van de omvormer*

Als vermogenelektronische componenten met een hogere schakelfrequentie gebruikt worden (MOSFET's of IGBT's), is de harmonische inhoud van spanning en stroom bij lagere frequenties beter. Vanaf 50 Hz wordt ook bij dit type omvormers overgegaan op een blokgolf, zodat er op dat ogenblik geen onderscheid is tussen de omvormers.

De stroomverdringing bij motoren met kooirotor die gebouwd worden voor 50 Hz bedrijf dient bij hergebruik van bestaande systemen in rekening gebracht te worden. Daarom zal men een bestaande motor minder mogen belasten bij 50 Hz uit een omvormer dan bij 50 Hz uit het net (figuur 8). Een merkwaardige uitzondering hierop vormt de sleepringmotor. Door de wikkeling op de rotor is er hier geen stroomverdringing, zodat de bijkomende verliezen bij omvormervoeding minimaal zijn.



*Fig. 8 Capaciteit van een inductiemotor*  
*0 onafhankelijke ventilator*  
*1 lage schakelfrequentie in de omvormer*  
*2 hoge schakelfrequentie in de omvormer*

De luchtspleetlengte van een bestaande motor beïnvloedt ook de bijkomende verliezen die door de harmonischen van de omvormer gegenereerd worden. Deze verliezen zijn immers omgekeerd evenredig met de lengte van de luchtspleet.

Recentelijk is er heel wat te doen over zogenaamde hoogrendementsmotoren en de mogelijke besparingen die hiermee realiseerbaar zijn. In de Verenigde Staten wordt hierover veel literatuur aangeboden. Men maakt vaak onderscheid tussen normale

motoren, hoogrendementsmotoren en hoogstrendementsmotoren (figuur 9). Hierbij dienen enkele aantekeningen gemaakt te worden.

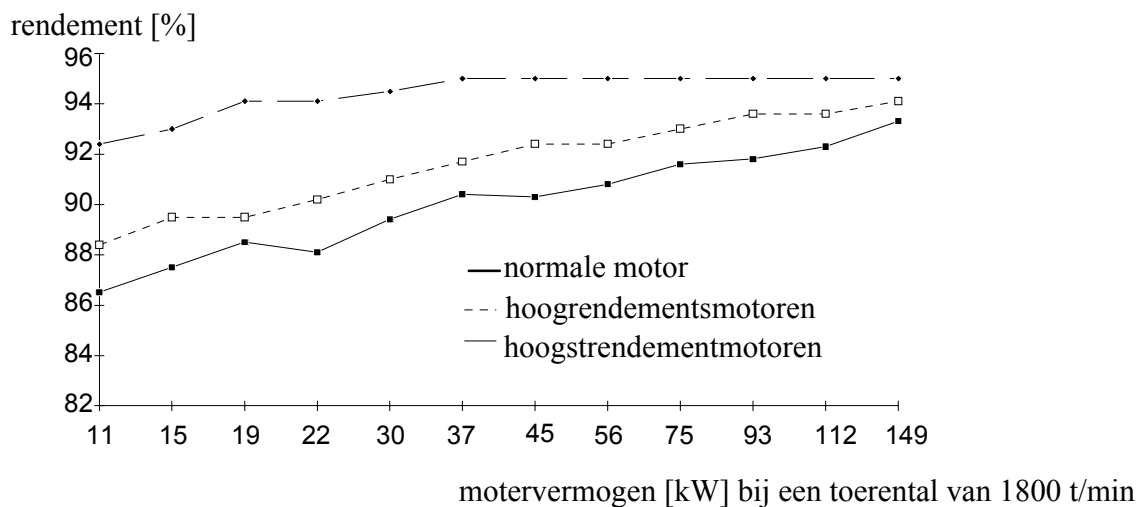


Fig. 9 *Vergelijking tussen normale motoren, hoogrendementsmotoren en hoogstrendementssymbolen.*

Vooreerst zijn deze rendementen enkel gegeven voor vollast. Ook de norm stelt enkel eisen bij vollast. Wat het deellast rendement is, is niet gespecificeerd. Het energetisch rendement, dat de verhouding geeft tussen de afgegeven mechanische energie en de opgenomen elektrische energie over een representatieve periode, waarin meestal een groot deel deellast optreedt, is dus onbepaald.

Verder geven deze motoren problemen bij aanloop, daar zij een veel hogere aanloopstroom trekken uit het net. Tenslotte garandeert een hoog rendement bij sinusoidale voeding helemaal geen hoog rendement bij omvormervoeding, integendeel.

## Koeling

Als het lastkoppel relatief hoog is bij lage snelheden, kan het noodzakelijk zijn een gedwongen koeling te installeren. De koelcapaciteit bij motoren met eigen ventilator vermindert immers aanzienlijk bij lage snelheden. Een alternatieve oplossing kan geboden worden door de keuze van een grotere motor. Hierdoor wordt ook de omvormer groter en duurder.

Daar de temperatuurstijging in de rotor bij omvormervoeding hoger is dan bij voeding vanuit het vast net, is het beter om machines te gebruiken met radiale koeling. Dit is een gevolg van het feit dat het primaire koelmiddel bij radiaal gekoelde machines eerst door de luchtkoelkanalen van de rotor stroomt, waardoor het de warmte zeer efficiënt van de rotor afvoert.

Bij hergebruik van bestaande motoren is een axiaal gekoelde machine minder geschikt dan een radiaal gekoelde. De temperatuurstijging bij sinusoidale voeding dient

gecontroleerd te worden. Als deze dicht bij de limiet zit voor de isolatieklasse moet het motorvermogen gereduceerd worden. Een reductie is niet nodig als de temperatuurstijging nog voldoende marge vertoont (ongeveer 20%).

## **Keuze van een aandrijfmotor**

Zonder volledigheid te willen betrachten kunnen toch enige trends voor een aangepaste motorkeuze gegeven worden.

Indien de gewenste dynamica beperkt is, is de inductiemotor met kooirotor gevoed met een spanningstussenkringomvormer met pulsbreedtemodulatie de gepaste keuze. Voor grote vermogens komt de omvormer met stroomtussenkring beter uit de verf ( $\pm 1$  MW), tenzij het gewenste snelheidsbereik beperkt is, zodat de ondersynchrone cascade goedkoper uitkomt. Voor zeer grote vermogens worden synchrone motoren met aangepaste omvormer gebruikt.

Indien een hoge dynamische respons vereist is, is de keuze minder evident en veel uitgebreider.

Voor servomotoren heeft de synchrone motor en daartoe behoren ook de zogenaamde borstelloze gelijkstroommachines, de gelijkstroommotor met borstels bijna volledig verdrongen. Een veldgeoriënteerde regeling met positieve terugkoppeling is noodzakelijk. Indien de dynamische eisen niet extreem zijn, komt ook de inductiemotor met veldoriëntering in aanmerking.

Voor grotere machines is de keuze tussen de onafhankelijk bekrachtigde gelijkstroommotor en de inductiemotor met veldoriëntering. Het dynamisch gedrag van de vierkwadrantsgelijkstroommotorsturing met kringstroom is nog steeds onovertroffen. Toch wint de inductiemotor steeds veld. Zo zijn kraanaandrijvingen met frequentie-omvormergestuurde inductiemotor met veldoriëntering zeer goed haalbaar en zij verdrijven daar de sleepringmotor stelselmatig.

Heel wat bestaande kranen met sleepringmotoren worden omgebouwd met behoud van de motor met bewikkelde rotor die dan uiteraard kortgesloten wordt. Voor liften die in feite dezelfde dynamica nodig hebben als kranen, is deze overstap van gelijkstroom naar wisselstroom minder evident omwille van geluidsproblemen.

Voor heel grote, dynamische aandrijving, zoals de walsen van staalfabrieken, kunnen met succes synchrone machines met veldoriëntering gebruikt worden.

Tenslotte dient erop gewezen te worden dat voor sommige aandrijfsystemen de geschakelde reluctantiemotor mogelijkwijze een alternatief biedt. Op dit vlak bestaat er op dit ogenblik nog geen duidelijkheid en verder fundamenteel onderzoek is hier noodzakelijk.